

طراحی و ساخت لایه‌های نازک اپتیکی با نمایه ضخامت متغیر برای تولید آینه‌های VRM

حمیدرضا فلاح^۱، ابوالحسن مبشری^۱ و حسین ثقفی^۲

۱. گروه پژوهشی اپتیک کوانتومی، گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان

۲. دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مرکز تحقیقات اپتیک و لیزر

(دریافت مقاله: ۸۳/۹/۲۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۱۰/۲۰)

چکیده

در این مقاله چگونگی طراحی و ساخت آینه‌هایی با بازتابندگی متغیر توضیح داده می‌شود. برای ساختن چنین آینه‌هایی از یک ماسک ثابت با سوراخ دایره‌ای استفاده شده است. برای توصیف فرآیند لایه نشانی، روزنه ماسک لایه نشانی به صورت یک چشمه گسترده در نظر گرفته شده است. تابع توزیع ذرات از این روزنه به صورت $\cos^x(\theta)$ توصیف می‌شود که x پارامتر تابع توزیع ذرات است. پس از مشخص شدن پارامتر x توسط آزمایش، نمودارهایی را می‌توان رسم کرد که این نمودارها پارامترهای ماسک لایه نشانی را به پارامترهای نمایه لایه نشانداده شده روی بستره مربوط می‌کنند. با استفاده از این نمودارها انواع مختلفی از آینه‌ها با نمایه ضخامت دلخواه را می‌توان تولید کرد. در قسمت پایانی این مقاله اثرات خطای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها بر فاز بازتابش و تراکسیل آینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: آینه با بازتابندگی متغیر، لایه نشانی اپتیکی، فاز تراکسیل، مد آبر گوسی

۱. مقدمه

پرتو در نقطه‌ای است که بازتابش به $\frac{1}{e^2}$ مقدار بیشینه‌اش کاهش می‌یابد. این نمایه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. چنین نمایه‌هایی در مرکز تخت هستند ولی در لبه‌ها خیلی سریعتر از نمایه‌گوسی ($n=2$) به صفر کاهش می‌یابند. این نمایه‌ها را می‌توان حد فاصل نمایه‌های گوسی و مربعی در نظر گرفت.

بهترین روش برای ساختن این آینه‌ها قرار دادن یک ماسک بین چشمه تبخیر و بستره مورد نظر است. حضور ماسک باعث می‌شود که با ایجاد اثر سایه‌افکنی، نمایه‌های بازتابی مورد نظر به دست آید [۲]. این روش برای اولین بار توسط امیلیانی برای لایه نشانی به روش کندوپاش و توسط زیزو برای لایه‌نشانی توسط لیزر CO₂ انجام شد [۳ و ۴].

در این تحقیق روش ماسک ثابت برای لایه‌نشانی به روش تبخیر حرارتی به کار گرفته شده است. لایه‌های دی‌الکتریک

آینه‌های دی‌الکتریک که نمایه بازتابی آنها به صورت شعاعی تغییر می‌کند (VRM)، به دلیل مزیت‌هایی که بر آینه‌های معمولی دارند، به صورت گسترده‌ای در مشددهای ناپایدار به کار گرفته می‌شوند. مزیت‌های به کارگیری این آینه‌ها عبارتند از: محدود شدن پراش از لبه‌های آینه، بهتر شدن خاصیت کانونی شدگی پرتو لیزری، حجم زیادتر مد لیزری و ... [۱]. مؤثرترین نمایه بازتابی برای به دست آوردن اهداف ذکر شده در بالا، آینه‌ای با نمایه بازتابی آبرگوسی است. وابستگی شعاعی نمایه بازتابی چنین آینه‌هایی به صورت زیر است:

$$R(r) = R_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{w}\right)^n\right), \quad (1)$$

که R_0 بازتابش در مرکز آینه، n مرتبه آبرگوسی و w پهنای

$$d(r) = \frac{\lambda}{4\pi r} \cos^{-1} \left[\frac{(1 + r_{12} r_{eq}^2)R(r) - r_{12}^2 - r_{eq}^2}{2r_{12} r_{eq} (1 - R(r))} \right], \quad (2)$$

که در آن

$$r_{eq} = \frac{r_{12} + r_{12} \exp\left(\frac{-i4\pi r d_r}{\lambda}\right)}{1 + r_{12} r_{12} \exp\left(\frac{-i4\pi r d_r}{\lambda}\right)}, \quad (3)$$

که d_r ضخامت لایه ضد بازتاب و r_{ij} ضریب فرنل بازتابش از سطح مرزی i و j است.

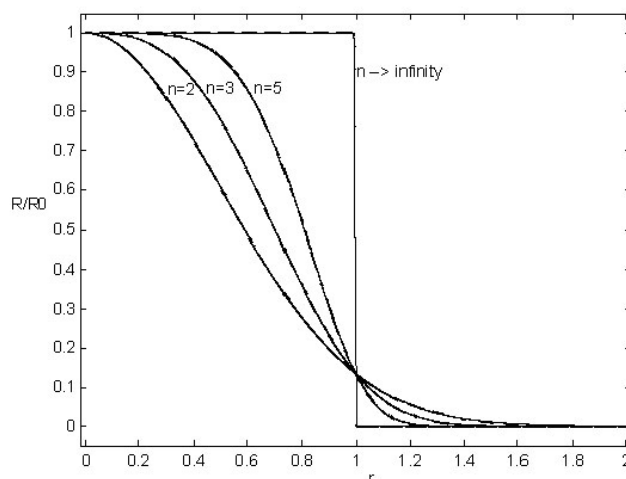
۳. طراحی لایه نشانی با ماسک

تغییرات شعاعی ضخامت برای لایه شیب‌دار را می‌توان با وارد کردن یک ماسک ثابت با سوراخ دایره‌ای، بین چشمه تبخیر و بستره ایجاد کرد. هندسه لایه نشانی را می‌توان توسط پارامترهای قطر سوراخ ماسک (D) و فاصله بین ماسک و بستره (H) توصیف کرد. وارد کردن ماسک بین چشمه و بستره باعث می‌شود به خاطر اثر سایه افکنی ماسک، لایه‌ای ایجاد شود که حداکثر ضخامت آن در مرکز است و ضخامت آن به صورت شعاعی که از مرکز دور می‌شویم، کاهش می‌یابد. با کنترل کردن پارامترهای هندسی لایه نشانی (D, H) می‌توان مقدار پارامترهای n و w نمایه بازتابش را کنترل کرد. مقادیر D و H در مقایسه با فاصله بین چشمه تبخیر و ماسک بسیار کوچک هستند.

برای به دست آوردن رابطه بین پارامترهای ضخامت لایه و پارامترهای ماسک لایه نشانی، مدل‌های مختلفی نظیر بررسی انتشار مولکولهای بخار و یا تعریف تابع گرین برای روزنه ماسک در نظر گرفته شده است که بعضی از آنها توافق خوبی با نتایج تجربی نداشته است [۳، ۴]. در این تحقیق به جای مدل‌های قبلی، مدلی را به کار گرفته‌ایم که در آن، روزنه ماسک به عنوان یک چشمه مجازی در نظر گرفته می‌شود [۶]. به دلیل تقارن دایره‌ای، هر جزء سطح ds سوراخ در زاویه فضایی $d\Omega$ ، جرم زیر را از خود عبور می‌دهد:

$$dM = k \cos^x \theta d\Omega, \quad (4)$$

که θ زاویه بین جهت انتشار و خط عمود بر سطح چشمه



شکل ۱. نمایه‌های آبرگوسی با مرتبه‌های مختلف.

مناسب برای طول موج لیزر Nd:YAG ($\lambda = 1.064 \mu m$)، با دو ماده MgF_2 ($n_l = 1.38$) و ZnS ($n_h = 2.35$) روی بستره‌هایی با ضریب شکست $n_s = 1.52$ لایه نشانی شده است.

۲. طراحی لایه نشانی

اولین لایه‌ای که روی بستره نشانداده می‌شود لایه ضد بازتابی با ضریب شکست پایین است که در تمام سطح بستره ضخامت یکنواخت دارد. لایه دوم لایه‌ای با ضریب شکست بالا است که ضخامت آن به صورت شعاعی تغییر می‌کند. برای به دست آوردن نمایه ضخامت، از تئوری تداخل امواج در لایه‌های نازک استفاده می‌کنیم [۵]. در محاسبه نمایه ضخامت به شرطهای زیر نیز توجه داریم:

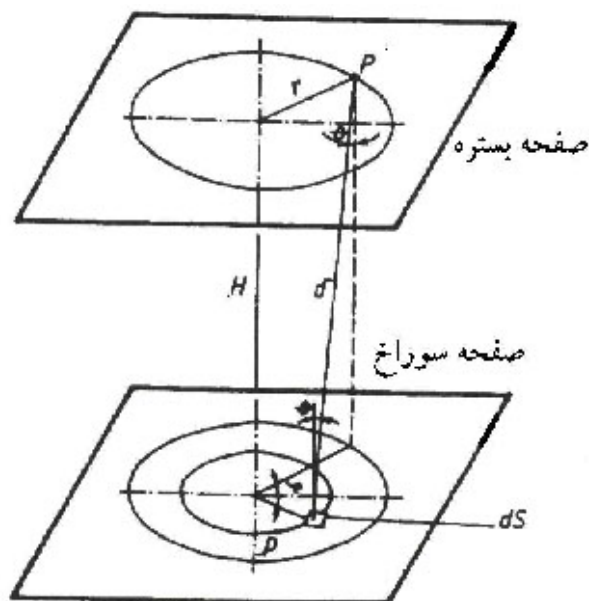
۱- در $d = d_{max}$ ، بازتابش حداکثر مقدار خودش را دارد.

۲- در $d = 0$ بازتابش به صفر کاهش می‌یابد.

۳- در سایر نقاط بازتابش به صورت

$$R(r) = R_0 \exp\left(-2\left(\frac{r}{w}\right)^n\right)$$

لایه ضد بازتابی اولیه و بستره را به صورت یک لایه معادل در نظر می‌گیریم و آن را با زیر نویس eq نشان می‌دهیم. با استفاده از تئوری تداخل امواج در لایه‌های نازک، نمایه ضخامت لایه شیب‌دار به صورت زیر به دست می‌آید:



شکل ۲. ساختار هندسی برای محاسبه نمایه ضخامت.

به دلیل اینکه دستگاه فاقد سیستم کنترل ضخامت حین لایه نشانی بود، ابتدا سیستم را برای هر دو نوع ماده ZnS و MgF_2 به صورت جداگانه کالیبره کردیم. برای به دست آوردن ضخامت لایه نشانداده شده از روش جرمی بهره گرفته‌ایم که ضخامت از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$t = \frac{m}{\rho A}, \quad (6)$$

که A مساحت و m تفاوت جرم بستره قبل و بعد از لایه نشانی را نشان می‌دهد. دقت ترازوی مورد استفاده 0.1 mg بوده است. به منظور تنظیم دستگاه برای لایه نشانی ZnS ، بستره در ارتفاعهای مختلفی از سطح چشمه تبخیر قرار گرفت و برای جرمهای مختلفی از ZnS ، لایه نشانی انجام شد. طبق محاسبات انجام شده ضخامت چارک موجی برای ZnS برابر با 113 nm است. نتایج حاصل از آزمایشهای انجام شده در شکل ۳-الف ارائه شده است. با مقایسه نمودارهای ارائه شده و مقدار به دست آمده از محاسبات، فاصله $7/5 \text{ cm}$ بالای چشمه و جرم 13 mg برای به دست آوردن لایه $\frac{\lambda}{4}$ توسط ZnS در قسمتهای بعدی استفاده شد.

مرحله بعدی کالیبراسیون دستگاه برای لایه نشانی توسط

است و x پارامتر تابع توزیع چشمه است. در حالت کلی پارامتر x با توجه به شکل چنبره لایه نشانی^۱ و روش تبخیر ماده، تغییر می‌کند. بر اساس هندسه نشان داده شده در شکل ۲، ضخامت هندسی لایه نشانداده شده در نقطه‌ای به فاصله r روی سطح بستره را می‌توان با در نظر گرفتن سهم تمام نقاط روی سطح چشمه (روزنه) به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{d(r)}{d(r=0)} = \frac{4}{\pi D^2} \int_0^{2\pi} \int_0^D \frac{(H^2 + \rho^2)^{\frac{x+2}{2}} \rho d\rho d\varphi}{(H^2 + \rho^2 + r^2 - 2r\rho \cos \varphi)^{\frac{x+2}{2}}},$$

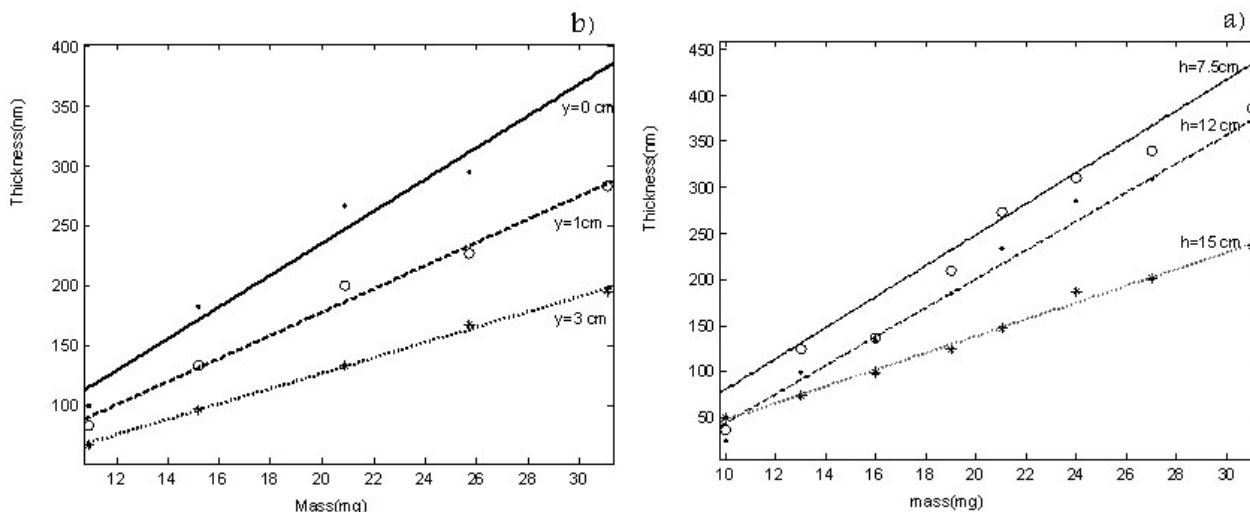
که ρ و φ مختصات قطبی در صفحه ماسک است. برای سادگی، ضخامت را به ضخامت در مرکز بهنجار کرده‌ایم.

با توجه به فاصله زیاد چشمه اصلی تا ماسک نسبت به فاصله ماسک تا بستره می‌توان با حل انتگرال رابطه (۸) به صورت عددی، نمایه ضخامت را به دست آورد. ولی قبل از حل این انتگرال باید پارامتر x را تعیین کنیم. برای تعیین این پارامتر، لایه نشانی را توسط ماسکهایی با روزنه دلخواه انجام می‌دهیم. سپس ضخامت نمونه‌ها را به صورت نقطه به نقطه تعیین می‌کنیم. در ادامه به روش حداقل مربعات گوسی، منحنیهای را روی نقاط تجربی برازش می‌کنیم. با استفاده از پارامتر n و w منحنیهای برازش شده، با استفاده از رابطه (۲)، نمایه ضخامت را محاسبه می‌کنیم. با مقایسه نمایه‌های به دست آمده با نتایج حاصل از رابطه (۵)، مقدار x را می‌توان تعیین کرد. با مشخص شدن مقدار پارامتر تابع توزیع پخش ذرات توسط روزنه، نموداری را می‌توان رسم کرد که به کمک این نمودار، برای شرایط اولیه لایه نشانی، انواع مختلفی از لایه‌ها با شیبهای دلخواه را می‌توان تولید کرد.

۴. آزمایشها

لایه نشانی توسط دستگاه لایه نشانی (Veeco V300) و به روش تبخیر حرارتی در فشار $5 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ انجام شده است.

۱. منظور از چنبره لایه نشانی، محفظه‌ای است که حلال در آن صورت می‌گیرد و عمل تبخیر و نشاندن مواد لایه‌نشانی روی بستره‌ها در این قسمت از دستگاه انجام می‌شود.



شکل ۳. نمودارهای کالیبراسیون دستگاه برای ZnS (a) توسط بستره‌هایی با ارتفاع مختلف و (b) توسط بستره‌هایی با فاصله عرضی متفاوت. نقاط، مقادیر تجربی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات ماسکهای استفاده شده برای ساخت آینه‌ها.

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴
D(mm)	۵	۵/۵	۵/۵	۵/۵
H(mm)	۲/۹	۱/۷	۲	۵

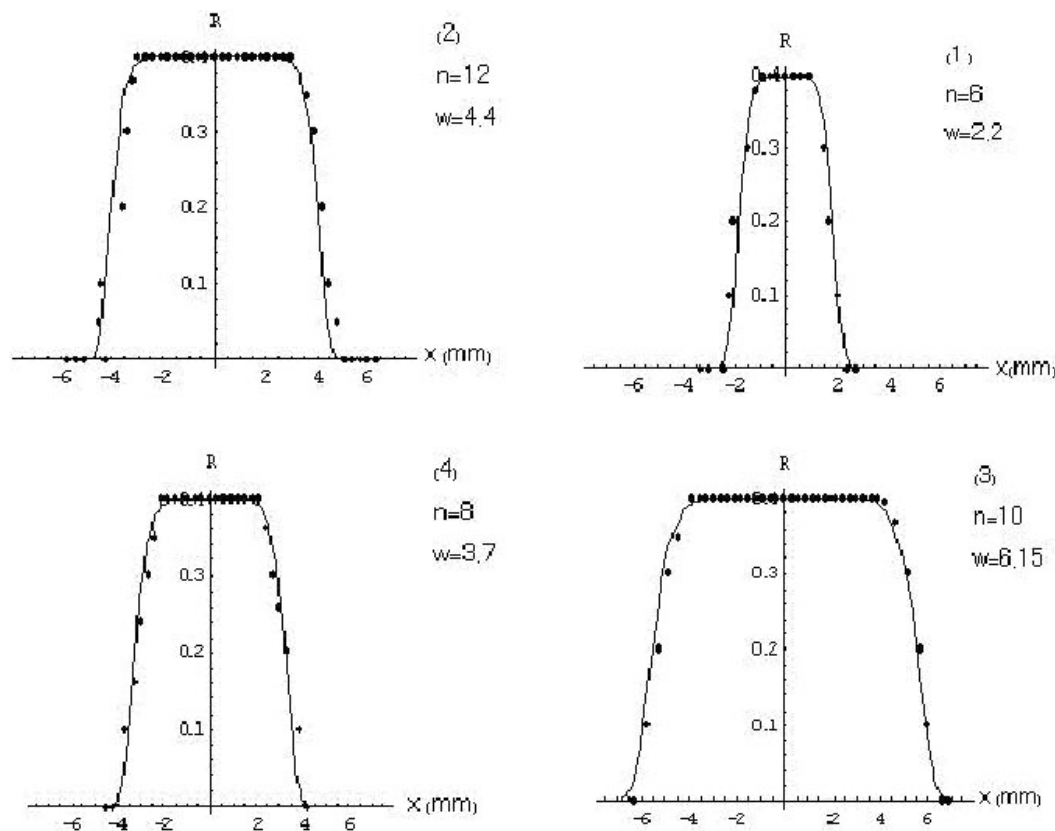
لیزر Nd:YAG به صورت نقطه به نقطه در سطح آینه اندازه‌گیری شد و سپس با در نظر گرفتن ضریب جذب، میزان انرژی بازتاب شده از هر نقطه سطح آینه محاسبه شده است. منحنی حاصل از اندازه‌گیری بازتابش پرتو لیزر از سطح نمونه‌ها رسم گردید. سپس برای به دست آوردن رابطه نمایه بازتابش هر کدام از نمونه‌ها، به روش حداقل مربعات گوسی منحنی‌هایی روی نقاط به دست آمده برازش شده است. پارامترهای n و w نمایه بازتابش هر کدام از نمونه‌ها در شکل ۴ در کنار منحنی مربوطه نشان داده شده است.

پس از به دست آوردن نمایه ضخامت نمونه‌های ساخته شده، پارامتر x روزنه ماسک را می‌توان تعیین کرد. برای این منظور از اطلاعات نمونه‌های شماره ۲، ۳ و ۴ که با ماسکی به قطر $D=5/5$ mm ولی فاصله‌های مختلف H لایه نشانی شده‌اند، می‌توان استفاده کرد. با استفاده از برنامه‌ای که بر اساس رابطه (۸) نوشته شده است، مقدار پارامتر x برابر ۰/۲۵ به دست

بود. این مرحله برای سه بستره یکسان که در ارتفاع ۷/۵ cm بالای چشمه و فواصل عرضی مختلف قرار گرفته بودند، انجام شد که نتایج حاصل از آزمایشها در شکل ۳-ب ارائه شده است. بر اساس محاسبات انجام شده ضخامت چارک موجی برای MgF_2 برابر با ۱۹۲ nm است. طبق این نمودار مقدار ۳۱/۱ mg برای بستره‌ای که در فاصله عرضی ۳ cm و ارتفاع ۷/۵ cm بالای بستره قرار گرفته است، برای لایه نشانی نهایی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که تمام آزمایشهای بالا بدون حضور ماسک انجام شده است.

برای انجام لایه نشانی اصلی، آزمایش با ماسک‌هایی که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است، انجام شد.

برای به دست آوردن نمایه بازتابش از سطح آینه‌ها، نمونه‌ها روی یک پایه قابل حرکت با دقت ۰/۰۱ mm قرار داده شد. گامهای حرکت ۰/۰۳ mm و پهنای لکه لیزر Nd:YAG مورد استفاده ۰/۱ mm بود. با این کار به طور مستقیم تراکسیل پرتو



شکل ۴. نمایه بازتابش نمونه‌های ساخته شده که دایره‌ها مقادیر تجربی و خطوط، منحنیهای برازش شده را نشان می‌دهند.

اثر روزنه از بین می‌رود و روزنهٔ ماسک مثل یک چشمه گسترده عمل می‌کند. این موضوع برای $H=4$ ، $D=5$ به صورت واضح‌تری مشاهده می‌شود.

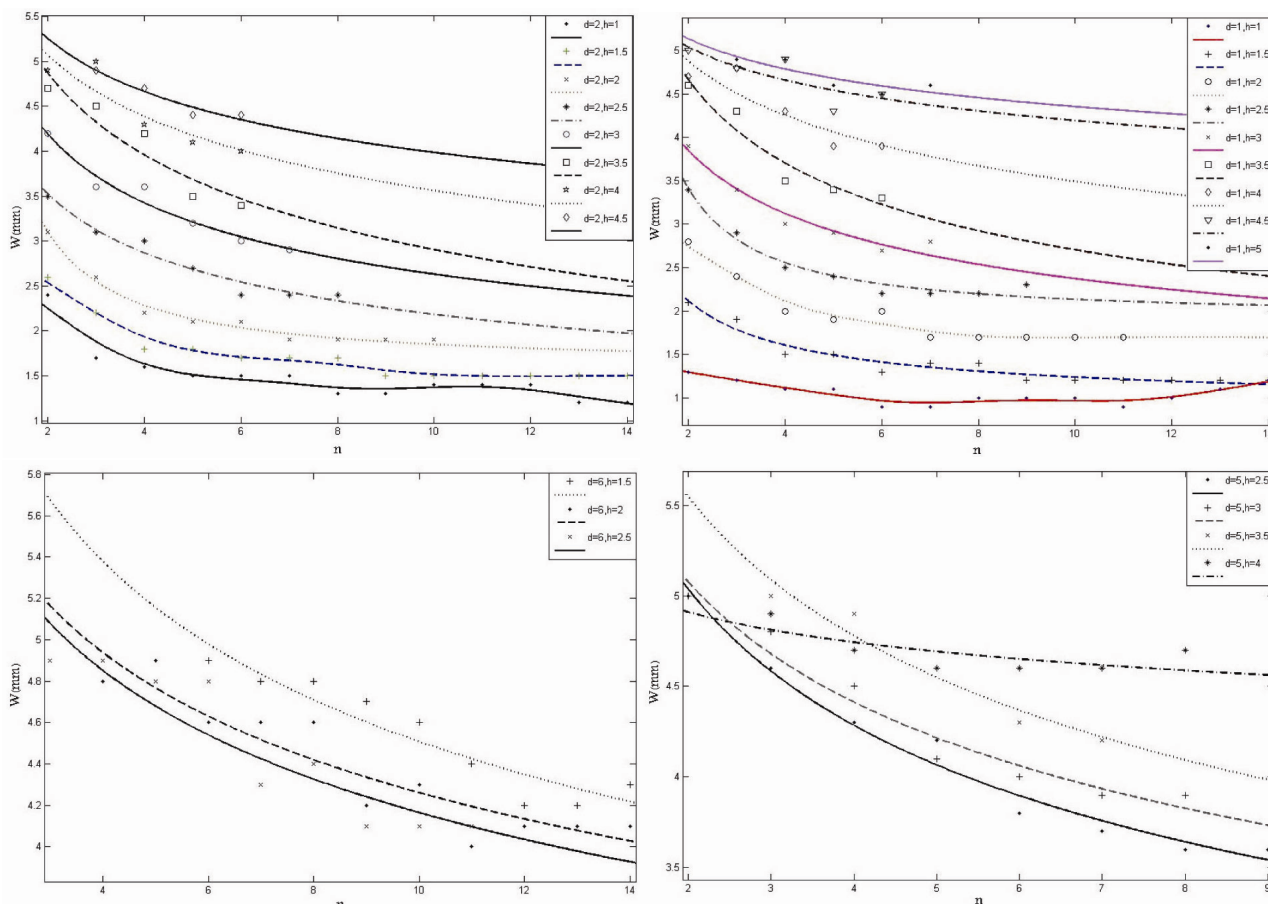
۵. بررسی اختلاف فاز بازتابش و تراگسیل امواج فرودی روی آینه‌ها

پرتو لیزری فرود آمده روی آینه‌های معمولی لیزر، در اثر بازتابش اختلاف فاز π پیدا می‌کند. در حالتی که ضخامت لایه‌ها تغییر می‌کند، اختلاف فاز بین موج فرودی و بازتابی برابر π نیست و با تغییر ضخامت، تغییر می‌کند. همچنین تغییر ضخامت، بر فاز پرتوهای عبوری نیز اثر می‌گذارد. با توجه به کار برد این نوع آینه‌ها در مشدد لیزری، با بررسی اختلاف فاز بین پرتو فرودی و پرتو عبوری از آینه می‌توان به چگونگی عملکرد این نوع آینه‌ها پی برد.

اختلاف فاز بین موج فرودی و موج بازتابی برابر است با:

آمد. با استفاده از این پارامتر و رابطه (۸) منحنی $n-w$ برای مقادیر مختلف D و H رسم شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. این منحنیها رابطهٔ بین پارامترهای هندسی لایه‌نشانی و پارامترهای نمایه ضخامت لایهٔ نشانده شده را نشان می‌دهند و با استفاده از آنها می‌توان برای هر مقدار دلخواه n و w ، مقدار D و H مناسبی را انتخاب کرد و لایه نشانی مورد نظر را انجام داد.

در شکل ۵ منحنیها به گونه‌ای رسم شده‌اند که از بالا به پایین فاصلهٔ H کاهش می‌یابد و هر دسته از منحنیها مربوط به یک D خاص می‌باشد. همان طور که در این منحنیها مشاهده می‌شود، در یک D خاص با افزایش مقدار H ، منحنی به یک خط راست و افقی تبدیل می‌شود چرا که با افزایش مقدار H اثر سایه‌افکنی ماسک به تدریج کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار D ، در فواصل محدودتری از H ، منحنی n بر حسب w را می‌توان رسم کرد. چون که با افزایش قطر روزنهٔ ماسک (D)،



شکل ۵. منحنی $n-w$ برای مقادیر مختلف D و H .

برای MgF_2 خطای وارد شده در ضخامت برابر 17 nm و برای لایه‌ای از جنس ZnS برابر 13 nm است. در این قسمت اثر خطای ضخامت لایه‌ها بر روی فاز بازتابش آینه‌های ساخته شده، محاسبه شده است و در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل منحنی پیوسته، فاز بازتابش برای لایه نشانی چارک موجی، منحنی خط چین فاز بازتابش برای لایه‌ای با افزایش ضخامت و منحنی نقطه چین فاز بازتابش برای لایه‌ای با کاهش ضخامت را نشان می‌دهد.

طبق شکل ۶ افزایش ضخامت باعث افزایش زاویه فاز در ناحیه شیب‌دار می‌شود ولی در ناحیه ضد بازتابی تأثیر چندانی بر زاویه فاز ندارد. کاهش ضخامت در ناحیه شیب‌دار تأثیر چندانی بر فاز بازتابش ندارد ولی فاز بازتابش در ناحیه‌ای با پوشش ضد بازتابی را کاهش می‌دهد. در ناحیه بازتابی ضریب

$$\Delta\phi^R(r) = \phi^R(\cdot) - [\phi^R(r) + \nu\phi_{air}(r)] \quad (7)$$

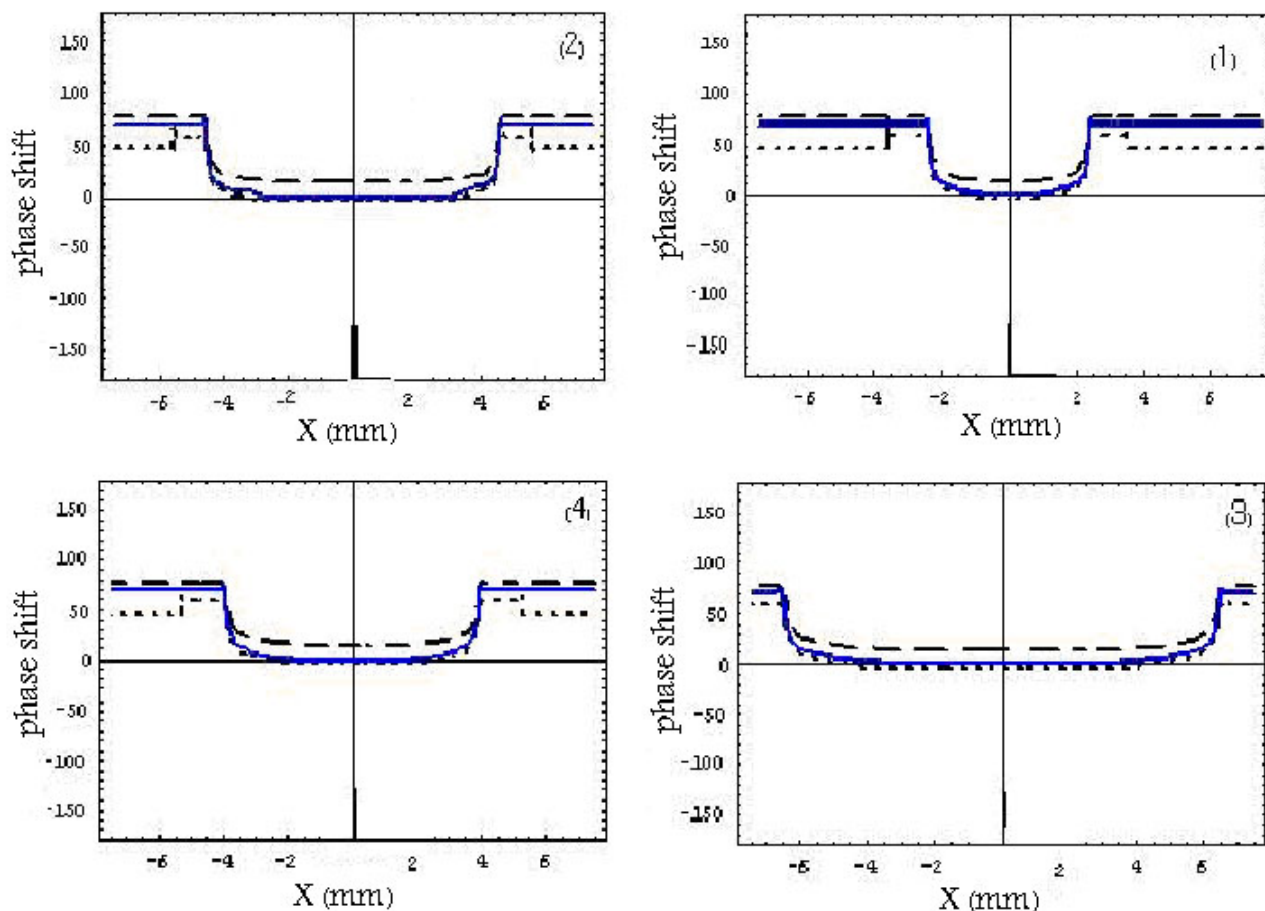
$\phi^R(r)$ جابه‌جایی فاز در اثر بازتابش است و $\phi_{air}(r)$ جابه‌جایی فاز در اثر عبور از هوا است [۷].

با استفاده از رابطه بالا اختلاف فاز بین امواج فرودی و بازتابی برای نمونه‌های ساخته شده، به دست آمده که در شکل ۶ نشان داده شده است.

مسئله مهمی که در ساخت لایه‌های نازک وجود دارد، ضخامت اپتیکی این لایه‌هاست. با توجه به اینکه از روش جرمی و ترازویی با دقت 0.1 mg برای اندازه‌گیری ضخامت استفاده شده است خطای ناشی از استفاده از این روش برابر است با:

$$\Delta d = \frac{\Delta \rho}{\rho} (\text{nm}) \quad (8)$$

که ρ چگالی ماده مورد استفاده است.



شکل ۶. منحنی فاز بازتابش برای نمونه‌های ساخته شده. منحنی پیوسته فاز بازتابش برای نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد، در حالی که منحنی خط چین فاز بازتابش در اثر افزایش ضخامت و منحنی نقطه چین فاز بازتابش در اثر کاهش ضخامت را نشان می‌دهد.

است. در این شکل منحنی پیوسته فاز تراگسیل پرتو از لایه‌ای با ضخامت $\frac{\lambda}{4}$ ، منحنی خط چین فاز تراگسیل از لایه‌هایی با ضخامت افزایش یافته و منحنی نقطه چین، فاز تراگسیل از لایه‌هایی با ضخامت کاهش یافته را نشان می‌دهد.

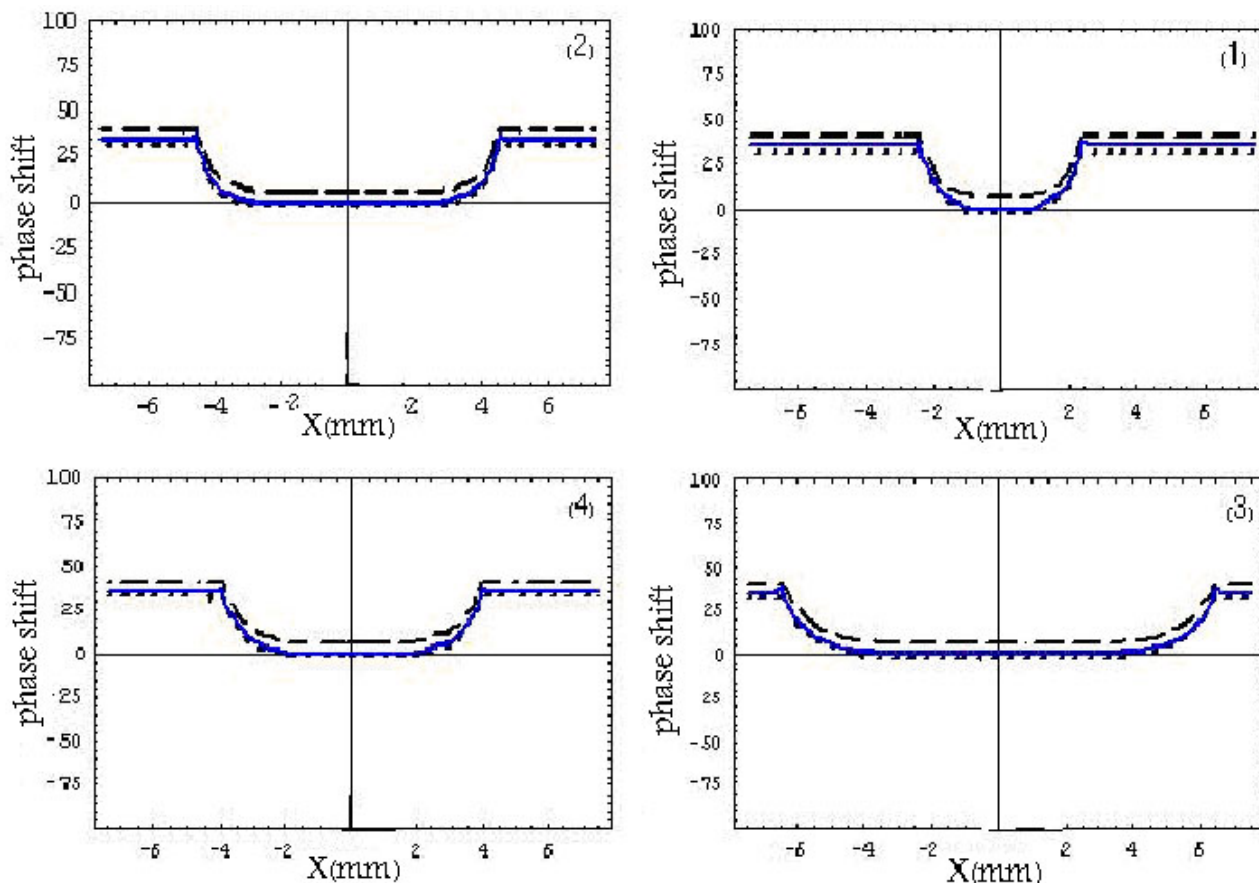
اختلاف فاز ایجاد شده در اثر تراگسیل پرتو، شکل پرتو خروجی را نشان می‌دهد. طبق منحنی‌های شکل ۷ پرتو خروجی نمایه‌ای متناسب با نمایه آینه دارد. بر اساس این منحنیها با افزایش ضخامت برای تمام ناحیه لایه نشانی شده، فاز تراگسیل افزایش می‌یابد، البته این افزایش برای ناحیه بازتابی بیشتر از ناحیه ضد بازتابی است. با کاهش ضخامت، فاز تراگسیل کاهش می‌یابد که این کاهش برای ناحیه ضد بازتابی بیشتر است.

شکست معادل لایه‌ها کوچک‌تر از ضریب شکست هوا است و به همین دلیل در فاز بازتابش بی تأثیر است. در حالی که ضریب شکست ناحیه ضد بازتابی بزرگ‌تر از واحد است و باعث ایجاد اختلاف فاز ۷۰ درجه بین پرتو فرودی و پرتو بازتابی است.

پس از بررسی اثر نمایه‌های ضخامت بر فاز پرتوهای بازتابی، اثر آن‌ها بر فاز پرتوهای عبوری نیز بررسی شد. جابه‌جایی فاز در اثر تراگسیل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta\phi^T(r) = \phi^T(\cdot) - [\phi^T(r) + \phi_{air}(r)] \quad (9)$$

که $\phi^T(r)$ جابه‌جایی فاز در اثر تراگسیل است [۵]. با استفاده از رابطه بالا، اختلاف فاز در اثر تراگسیل برای نمایه ضخامت نمونه‌ها محاسبه شده و منحنی‌های آن در شکل ۷ نشان داده شده



شکل ۷. منحنی فاز تراگیسل برای نمایه‌های مختلف. منحنی پیوسته فاز تراگیسل لایه‌ای با ضخامت $\frac{1}{4}$ ، منحنی خط چین فاز تراگیسل برای لایه‌ای با افزایش ضخامت و منحنی نقطه چین فاز بازتابش برای لایه‌ای با کاهش ضخامت را نشان می‌دهد.

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق آینه‌هایی با بازتابندگی متغیر ساخته شد. برای پیدا کردن رابطه بین پارامترهای هندسی لایه نشانی و پارامترهای نمایه آبرگوسی، مدلی مورد استفاده قرار گرفت که بر اساس آن روزنه ماسک به عنوان یک چشمه مجازی در نظر گرفته می‌شود و پارامتر x مربوط به این چشمه به کمک آزمایش به دست آمد. با استفاده از نتایج به دست آمده، منحنیهایی که پارامترهای لایه نشانی را به پارامترهای آبرگوسی مربوط می‌کند، رسم شد. با استفاده از این منحنی، برای شرایط ذکر شده، انواع مختلفی از نمایه‌های آبرگوسی را می‌توان تولید کرد. البته برای بررسی دقیق‌تر باید وابستگی پارامتر تابع توزیع روزنه ماسک به پارامترهای D و H را نیز باید در نظر بگیریم که

این موضوع در کارهای بعدی باید مورد بررسی قرار گیرد. با رسم منحنی بازتابش مشاهده شد که خطای ضخامت لایه ضد بازتابی بر بازتابش اثر بیشتری دارد. همچنین منحنی فاز تراگیسل، وابستگی شکل پرتو خروجی به نمایه آینه را نشان می‌دهد. در این منحنی، افزایش ضخامت نسبت به کاهش آن اثر بیشتری بر فاز تراگیسل دارد.

قدردانی

در پایان از تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان و از آقای دکتر یوسفی در دانشگاه صنعتی مالک اشتر که امکانات آزمایشگاه تکنیک خلاء را در اختیار ما قرار داده بودند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

مراجع

1. S De Silvestri, P Laporta, V Magni and O Svelto and G Valentini, *IEEE J. Quantum Electron*, **26** (1990) 1500.
2. S De Silvestri, P Laporta, V Magni and O Svelto, *Optics Comm.* **67** (1989) 229.
3. G Emiliani, A Piegari, S De Silvestri, P Laporta and V Magni, *Appl. Optics*, **28** (1989) 2832.
4. C Zizzo, C Arnone, C Cali and S Sciortino, *Optics Lett.* **13** (1988) 342.
5. H A Maclead, "Thin film Optical filters", IoP, 3ed (2001).
6. P Lavigne, N McCarthy and J G Demers, *Appl. Optics*, **16** (1985) 2581.
7. E Nichelatti, A Tirabassi and E Melissano, *Pure Appl. Optics*, **3** (1994) 477.